

# 합성가스(H<sub>2</sub>/CO)/공기 예혼합 충돌화염의 연소 및 열전달 연구

## Part II : 열전달 특성

심근선<sup>1</sup> · 정병규<sup>1</sup> · 이용호<sup>2</sup> · 이기만<sup>3†</sup>

<sup>1</sup>순천대학교 대학원, <sup>2</sup>전남대학교(여수캠퍼스) 기계자동차공학부, <sup>3</sup>순천대학교 기계·우주항공공학부

### A Study on Combustion and Heat Transfer in Premixed Impinging Flames of Syngas(H<sub>2</sub>/CO)/Air Part II: Heat Transfer Characteristics

KEUNSEON SIM<sup>1</sup>, BYEONGGYU JEONG<sup>1</sup>, YONGHO LEE<sup>2</sup>, KEEMAN LEE<sup>3†</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Suncheon National Univ., 413, Jungang-ro, Sunchoen-Si, Jellanam-do, 540-742, Korea

<sup>2</sup>School of Mechanical and Automotive Engineering of Chonnam Nat. Univ., 50, Daehak-ro, Yeosu, Jellanam, 550-749

<sup>3</sup>School of Mechanical and Aerospace Engineering, Suncheon Nat. Univ., 413, Jungang-ro, Sunchoen, Jellanam, 540-742

**Abstract** >> An experimental study has been conducted to investigate the heat transfer characteristics of laminar syngas/air mixture with 10% hydrogen content impinging normally to a flat plate of cylinder. Effects of impinging distance, Reynolds number and equivalence ratio as major parameters on heat fluxes of stagnation point and radial direction were examined experimentally by the direct photos and data acquisitions from heat flux sensor. In this work, we could find the incurved flame behavior of line shaped inner top-flame in very closed distance between flat plate and burner exit, which has been not reported from general gas-fuels. There were 3 times of maximum and 2 times minimum heat flux of stagnation point with respect to the impinging distance for the investigation of Reynolds number and equivalence ratio effect. It was confirmed that the maximum heat flux of stagnation point in 1'st and 2'nd peaks increased with the increase of the Reynolds number due to the Nusselt number increment. There was a third maximum rise in the heat flux of stagnation point for larger separation distances and this phenomenon was different each for laminar and turbulent condition. The heat transfer characteristics between the stagnation and wall jet region in radial heat flux profiles was investigated by the averaged heat flux value. It has been observed that the values of averaged heat flux traced well with the characteristics of major parameters and the decreasing of averaged heat flux was coincided with the decreasing trend of adiabatic temperature in spite of the same flow condition, especially for impinging distance and equivalence ratio effects.

**Key words** : Syngas(합성가스), Impinging flame(충돌화염), Heat flux(열유속), Impinging distance(충돌거리), Stagnation point(정체점), Radial direction(반경방향)

## Nomenclature

<sup>†</sup> Corresponding author : kmlee@scnu.ac.kr

[ 접수일 : 2014.2.4 수정일 : 2014.2.19 게재확정일 : 2014.2.28 ]

Copyright © 2014 KHNES

$q_{st}''$  : heat flux of stagnation point, kW/m<sup>2</sup>

$q_r''$  : heat flux of radial direction, kW/m<sup>2</sup>

$\overline{q_r''}$  : averaged heat flux of radial direction, kW/m<sup>2</sup>

H/d : dimensionless impinging distance  
 A/F : air/fuel ratio  
 M<sub>i</sub> : molecular weight of i specie, kg/kmol  
 Y<sub>i</sub> : mass fraction of i species  
 Re : Reynolds number ( $=\rho_{mix}u_{exit}d/\mu_{mix}$ )  
 Nu : Nusselt number ( $=hd/k$ )  
 Φ : fuel/air equivalence ratio

## 1. 서 론

유리, 제지, 금속을 가공하는 산업에서는 제품의 품질보장을 위해 신속하고 균일한 가열기술이 필요한데 충돌가열(impinging heating)은 표면을 가열하는 효율적인 방법 중 하나로 전열 및 가열성능 향상을 위해 오래 전부터 널리 응용되었던 기술이다. 특히 피가열물의 품질과 직결되는 가열공정에서는 청정연료의 연소에 의해 피가열물을 오염시키지 않으면서 고온의 화염으로부터 향상된 전열성능으로 신속하게 가열시키는 충돌연소(impinging combustion)가 경쟁력을 확보하는 핵심기술이 되었다.

이 경우 균일가열이라는 조업 특성상 대부분의 연소기에서 예혼합 방식의 연소를 적용하고 있으며 일반적으로 단일조성의 가스연료가 주로 사용되어왔다. 이런 가운데 최근 미 활용된 혼합가스를 주 연료로 사용하려는 수요가 증가하면서 기존 연소기에서 수소(H<sub>2</sub>)나 수소가 다량 함유된 합성가스(syngas) 연소시스템이 부각되고 있다. 이런 경우 기존 연료에서 새로운 연료로 주 연료가 새롭게 교체되기 때문에 불가피하게 연소기 설계서부터 운전조건 변경 등 수소와 관련된 연소와 열전달 성능에 대한 주요 정보들이 새롭게 요구된다. 그런데 합성가스는 주성분이 수소(H<sub>2</sub>)와 일산화탄소(CO)가 대부분이어서 연소효율과 연소배가스 배출성능 등에서 우수한 성능을 나타내는 것으로 알려져 있으나, 주성분인 수소는 다른 일반 탄화수소연료에 비해 연소속도가 매우 빠르고 화염거동도 상이해서 조성비 변화가 연소기 주요성능인 연소와 열전달 특성에 큰 영향을 미치는 것으

로 알려져 있다. 또한 미래 에너지자원에서 중요한 역할을 할 것으로 기대되는 수소가 함유된 합성가스 연소시스템에서의 최적화된 열설계 정보를 도출하기 위해서는 조성비, 당량비, 유동조건 변화 그리고 특히 충돌제트연소에서는 충돌간격과 같은 연소와 열전달 성능과 밀접한 관련이 있는 변수들을 중심으로 이들 특성을 우선적으로 파악해야만 한다.

본 연구팀에서는 관련 분야에 유익한 정보를 제공할 목적으로 수소가 포함된 청정연료의 충돌가열을 모사할 수 있도록 합성가스 충돌제트 연소시스템을 구성하여 이에 대한 연구<sup>1-4)</sup>를 진행하였다. 이때 피가열물로 모사된 충돌면은 열교환기 형태로 화염으로부터 피가열물로 전달되는 열전달을 정량적으로 측정할 수 있어 화염의 연소성능과 함께 열전달성능을 동시에 평가할 수 있는 좋은 장점을 지니게 된다.

따라서 본 연구는 합성가스 충돌화염의 연소 및 열전달에 관한 연구 중 열전달특성에 관한 계속된 보고로 앞서 보고한 연소특성<sup>5)</sup>에서와 마찬가지로 수소함유량이 10%인 일정한 조성비에서 충돌화염에서 가장 중요한 변수들인 충돌거리(H/d), 레이놀즈수(Re) 그리고 당량비(Φ) 변화가 충돌면 정체점에서 열유속( $q_{st}''$ )과 반경방향의 열유속( $q_r''$ )에 미치는 영향을 우선적으로 조사한 후 향후 계속된 연구에서는 다양한 수소함유량에 따른 열전달 특성을 알아보고자 한다. 특히 반경방향 열유속 특성에서는 충돌연소에서 나타나는 정체영역(stagnation region)과 벽면제트영역(wall jet region)으로 나누어 각 영역별로 평균 열유속( $\overline{q_r''}$ )으로 조사한 뒤 충돌면 전체 평균값으로도 분석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구의 실험장치는 선 보고한 연구<sup>5)</sup>와 유사한 장치로 Fig. 1에 개략적으로 나타내었다. 버너는 출

구에서 속도분포가 균일한 층류유동을 형성하도록 출구직경 10mm 대비 교축비가 36인 수축형 노즐을 사용하였고 노즐 끝(tip) 부분은 화염에 의해 예열되 질 않도록 최대한 얇고 날카롭게 가공하였다. 버너의 전체적인 길이는 200mm로 역화방지와 난류억제를 위하여 버너 하단부에 지름 2.5mm인 스테인레스 볼을 넣었고 그 위에 메쉬층(mesh layer)을 차례로 형성시킴으로써 버너로 공급되기 전 정체실(Settling Chamber)을 거쳐 균일하게 예혼합된 합성가스·공기 혼합기가 완전 발달된 층류상태로 분사되도록 하였다. 또한 층류화염인 관계로 외부 교란에 의한 화염떨림이 열전달 성능에 직접적인 영향을 미치게 되므로 화염의 교란을 방지하기 위해 그림에서 보는 바와 같이 사각형의 아크릴 실드(Shield)를 버너와 충돌면 바깥쪽에 설치하였다.

연료는 화염의 특성을 보다 엄밀하게 관찰하기 위하여 99.999%의 고순도수소와 일산화탄소를 사용하였으며, 산화제도 99.99%의 고순도 압축용 공기를 사용하였다. 이들 유량은 버블(bubble) 유량계로 교정한 습식가스미터(wet gas meter)와 질량유량계(MFC)를 통해 정밀한 양으로 측정되어 합성가스 조성비변화에 따른 당량비 계산에 사용하였다.

충돌면은 각 실험조건에서 화염의 크기를 고려하여 지름 180mm의 알루미늄 재질로 제작하였으며 노즐과 충돌면간 조절은 상하 이송기구와 좌우 이송장치를 이용하여 고정된 충돌면에 대해 상대적으로 3차원이송이 가능하게 하였다. 충돌면의 중심에는 화염으로부터 전달되는 전열성능을 측정하기 위해 대류와 복사열전달을 같이 측정할 수 있는 열유속 센서(Vatell Co., TG-1000 수냉식)를 장착하여 별도 데이터 취득시스템(Daq system)을 통해 취득한 mV값을 센서업체에서 제공한 교정된 열유속값으로 환산하여 구하였다. 또한 센서 냉각과 충돌면 표면에 응축수가 생성되는 것을 방지하기 위해 별도의 온도조절기를 통하여 약 50°C의 물로 냉각시켰으며, 버너와

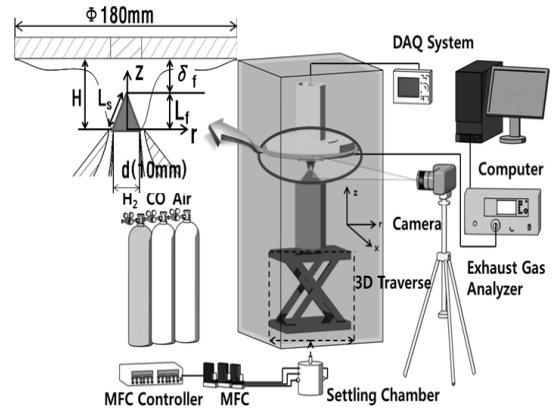


Fig. 1 Experimental set-up

충돌면 사이에서 거동하는 화염의 형상을 파악하고자 DSLR카메라(Nikon, D70s)를 사용하여 충돌화염의 주요 변수별 화염이미지를 취득하였다.

## 2.2 실험조건 및 방법

본 연구에서 모사된 합성가스 조성비는 주성분인 수소와 일산화탄소의 몰분율(mole fraction)이 10:90으로 일정하였으며, 충돌화염의 정체점과 반경방향의 열유속 분포에 영향을 미치는 인자로는 충돌거리(H/d), 레이놀즈수(Re) 그리고 당량비( $\Phi$ )를 주요변수로 하였다. 이러한 변수들을 중심으로 한 실험조건을 Table 1에 요약하였다.

여기서 충돌거리인 충돌면과 버너간 간격은 버너 출구 직경인 10mm로 무차원한 값으로 충돌면에 의해 화염이 간섭(intercept)을 받아도 내염(inner flame)이 형성된 H/d=0.4의 최소간격부터 본 실험장치 한계로 최대 높이인 H/d=8.4까지 조절하였다. 유동조건으로는 레이놀즈수로 층류구간인 Re=1200, 1400, 1600, 2000과 난류 초기값인 2400으로 조사하였으며, 이 경우 산출된 레이놀즈수는 혼합가스인 합성가스와 공기의 혼합기 가스를 기준으로 다음과 같은 식으로 정의하였다.

**Table 1** Experimental conditions

Fuel	high purified H <sub>2</sub> , CO
Oxidizer	high purified Air
Nozzle contraction ratio	36
Composition ratio	H <sub>2</sub> :CO = 10:90
Diameter of nozzle(d)	10mm
Radial distance(r/d)	0 ~ 6.0
Impingement distance(H/d)	0.4d ~ 8.5d
Reynolds number(Re)	1200 ~ 2400
Equivalence ratio(Φ)	1.0 ~ 4.0

$$Re = \frac{\rho_{mix} u_{exit} d}{\mu_{mix}} \quad (1)$$

$$\mu_{mix} = \frac{\sum(\mu_i Y_i \sqrt{M_i})}{\sum(Y_i \sqrt{M_i})} \quad (2)$$

혼합가스의 당량비는 다음 식 (3)으로 정의하였다.

$$\phi = \frac{(F/A)_{actual}}{(F/A)_{stoic}} \quad (3)$$

당량비 변화는 10% 수소함유량을 갖는 합성가스 인 경우 단일 가스연료와는 다르게 당량비 1.0 근처가 아닌 2.5에서 연소속도가 가장 빠른 결과를 기준하여 2.5보다 상대적으로 희박한 상태인 1.0과 1.5 그리고 역시 2.5보다 상대적으로 과농한 상태로 3.5와 4.0으로 하여 당량비에 따른 특성을 조사하였다.

또한 충돌제트화염 특성상 내염의 영향력이 큰 정체영역(stagnation region)과 내·외염이 충돌 후 충돌면 위로 형성되는 벽면제트영역(wall jet region)에 따라 열전달 특성이 다르므로 반경방향의 열유속 분포에서는 이러한 영역구분을 정체점에서 반경방향으로 가장 멀리 떨어진 열유속 피크값의 위치를 기준으로 하였다. 아울러 이들 영역과 충돌면 전체에 대한 평균 열유속( $\overline{q_r''}$ )값을 산출하는 방식은 반경방향

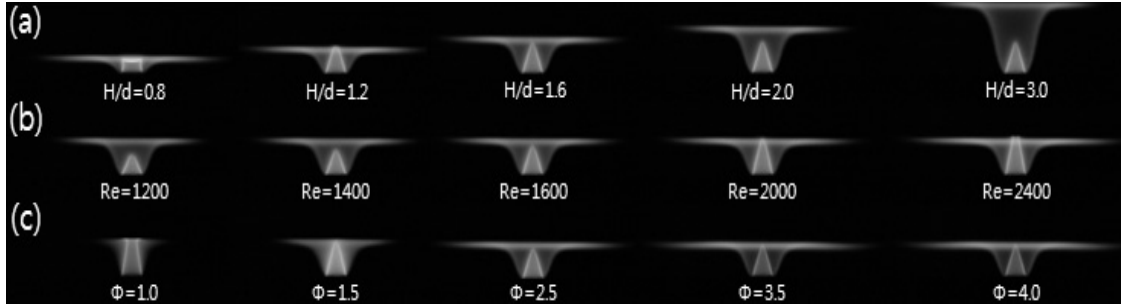
으로 측정된 열유속( $q_r''$ )값들의 분포도에서 사다리꼴 면적으로 계산한 열유속값들을 전체 합산한 후 구간별 거리로 나누는 방법으로 평균 열유속인  $\overline{q_r''}$  값을 구하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 변수별 충돌화염 형상

충돌제트화염(impinging jet flames)의 특성이나 성능에 관련된 여러 변수들 중 가장 대표적인 변수가 충돌면과 버너노즐간 거리인 H/d와 레이놀즈수(Re) 및 당량비(Φ)이다. Fig. 2는 이와 같은 대표적 변수 3개 중 2개 조건이 일정한 경우 나머지 한 조건에 따라 충돌면과 버너사이에서 존재하는 합성가스 충돌화염의 형상을 동일한 촬영조건으로 얻은 직접사진 이미지들이다. 예혼합된 제트화염이므로 보여진 모든 충돌화염에서 내부에 예혼합 반응영역인 내부화염(일명 내염)이 존재하고 내부화염 바깥쪽으로는 확산영역으로 외부확산화염(일명 외염)이 존재하는 구조를 취하고 있는데 각각 조건에 따라 서로 다른 형태의 화염형상을 하게된다.

먼저 Fig. 2의 맨 상단인 (a) 이미지들은 레이놀즈수 1600, 당량비가 2.5로 고정된 상태에서 충돌면과 버너노즐간 무차원 거리인 H/d(이하 충돌거리를 H/d로 함)를 가장 가까운 거리인 0.8부터 가장 먼 거리인 3.0으로 하였을 때 H/d에 따른 충돌화염의 거동을 보여주는 이미지들이다. 보는바와 같이 H/d=0.8인 경우 충돌거리가 좁아 화염이 충돌면에 의해 간섭(intercept)되어 내염의 선단이 팁형태가 아닌 일그러진 형상으로 눌러있으면서 차가운 충돌면과 좁은 간격으로 인한 스트레치(stretch)를 과도하게 받게 되어 정체점에서 열유속이 낮게 예측되는 경우이다. 충돌거리가 증가하여 H/d=1.2로 내염의 팁(tip)이 충돌면에 거의 접촉하는 위치가 되면 내염 팁(tip)의 높은



**Fig. 2** Impinging flame shapes for syngas(H<sub>2</sub>/CO)/air flame issuing from a nozzle burner(diameter of 10mm) at (a) Re=1600,  $\Phi$ =2.5 and for various H/d, (b)  $\Phi$ =2.5, H/d=1.6 and for various Re, (c) Re=1600, H/d=1.6 and for various equivalence ratios

온도와 충돌면 정체점간 온도구배가 가장 크게 되기 때문에 정체점에서 열유속이 가장 높게 예측되는 위치가 된다. 따라서 정체점 열유속이 최고가 되는 이 위치보다 더 증가하여 H/d가 1.6~3.0으로 증가하면 충돌면이 내부 반응영역에서 멀어지기 때문에 정체점 열유속에는 큰 차이가 없게 되나 충돌면 전체 열유속은 외부 반응영역대인 외염의 크기에 의해 좌우될 것이다. 다만 이 경우에는 H/d가 3.0으로 충돌거리가 비교적 짧은 위치인 관계로 다음 절에서 설명될 정체점의 열유속이 다시 증가하는 현상(다음 절의 3차 피크점 현상)은 나타나질 않게 된다.

Fig. 2-(b)는 당량비 2.5, H/d=1.6인 경우 충돌화염에서 대표적 유동조건인 레이놀즈수에 따른 화염의 형상들을 보여주고 있다. 레이놀즈수는 층류영역인 1200, 1400, 1600, 2000인 경우와 난류유동이 시작되는 2400인 경우로 층류와 난류 초반구간에서의 화염 형태를 보여주고 있다. 레이놀즈수 1200에서 1600까지는 내부반응영역인 내염이 평판에 접촉하지 않는 형상이나 레이놀즈수 2000이 되면 내염 팁부분이 충돌면에 직접 접촉되는 경우이므로 이 조건에서 정체점의 최대 열유속이 측정될 것으로 보인다. 혼합기 유속이 증가되어 레이놀즈수가 2400인 경우에는 난류초기인데다가 H/d=3.0으로 고정된 조건이라서 노즐 팁부분에서 화염기저 일부분이 부상되거나 겹보기에 필립같은 화염의 섭동현상은 발생하지 않았다. 다만 증가된 분출속도로 인해 이 경우 온도가 낮

은 내부 미연혼합기가 충돌면에 직접 부딪치어 정체점에서 열유속은 낮게 예측되는 경우이다.

Fig. 2-(c)는 레이놀즈수 1600, H/d=1.6으로 고정된 상태에서 당량비 변화에 따른 화염의 형상들을 보여주고 있다. H<sub>2</sub>:CO=10:90인 본 조성비에서 연소속도가 가장 빠르게 나타나는 당량비 2.5를 기준으로 연료가 희박한 조건인 당량비 1.0에서 과농한 조건인 4.0까지 변화될 때 당량비 변화에 따른 화염의 형상을 살펴보았다. 이전 연구<sup>(3,4)</sup>에 의하면 이 조건에서 당량비가 1.0인 경우 합성가스 연소속도가 가장 느리기 때문에 내부화염이 길어서 평판에 충돌하는 형상으로 나타난다. 여기서 당량비가 증가되면 연소속도가 증가하여 내염의 길이가 짧아지게 되는데 화염의 내염이 충돌면에 접촉되는 당량비 1.5가 되면 역시 이 조건에서 정체점의 열유속이 가장 크게 나타날 것으로 보인다. 당량비가 증가되어 2.5가 되면 연소속도가 가장 빠르기 때문에 화염이 좀 더 짧아져 충돌면에 닿지 않는 형상을 보여준다. 이후 당량비가 2.5이상인 과농한 조건이 되면 내부 반응대인 내염의 길이가 다시 증가하면서 벽면제트영역에서 반경방향으로 충돌면과 평행하게 펼쳐진 외부 반응대위치가 충돌면으로부터 조금씩 멀어지는 것을 볼 수 있다.

### 3.2 정체점 열전달특성

여기부터는 본 연구의 목적인 합성가스의 충돌 예

혼합화염에서 열전달특성을 파악하고자 대표적인 변수인 충돌거리(H/d), 레이놀즈수(Re), 당량비( $\Phi$ ) 중에서 유동과 연소특성을 대표하는 변수로 레이놀즈수와 당량비가 충돌거리에 따라 정체점 열유속( $q''_{st}$ )과 반경방향 열유속( $q_r''$ )에 미치는 영향에 대해서 조사해 보고자 한다.

먼저 본 절에서는 피가열물로 모사된 충돌면의 정체점에서 열전달특성에 대해서 살펴보았다.

### 3.2.1 레이놀즈수(Re) 영향

Fig. 3은 연소속도가 최대가 되는 당량비 2.5인 동일조건에서 충돌거리에 따라 화염이 충돌면 중심에 부딪치어 생긴 정체점에서의 열유속( $q''_{st}$ )을 레이놀즈수별로 나타낸 그래프이다. 이 경우 레이놀즈수는 동일 당량비 2.5에서 역화(flash-back)나 부상(lift-off)이 발생하지 않는 조건으로 층류와 난류초기 값인 Re= 1400부터 2400까지로 하였다. 또한 충돌면과 버너간 거리인 H/d 조절은 실험조건을 고려하여 가장 낮은 위치인 H/d=0.4부터 본 실험장치로 구현할 수 있었던 최고위치인 H/d= 8.4까지로 하였다.

먼저 레이놀즈수와 무관하게 정체점열유속 변화의 가장 큰 특징은 그래프에서 볼 수 있듯이 충돌거리에 따라 세 번의 최고점(peak point, 이하 피크점)과 두 번의 최저점을 갖는다는 것이다. 이중 1차 피크점과 1차 최저점은 Fig. 2-(a)의 첫 번째 화염형상처럼 내부반응영역 즉 내염이 충돌면에 충돌하면서 눌린 형태로 존재하여 나타나는 현상으로, 충돌면이 아주 가까운 위치인 H/d=0.4에서는 내부화염의 선단(top)이 팁(tip)형태가 아닌 선(line)형태로 존재하게 되어 1차 피크값을 갖게 된다. 이때 H/d가 조금 증가하게 되면 2차 피크값이 발생하기 전까지는 흥미롭게도 화염선단의 선형태가 가운데가 살짝 안으로 말려들어가는 만곡현상(in curved)이 발생하면서 열유속값이 낮아지다가 조금 더 H/d가 증가하면 안으로 말렸던 화염선단이 다시 위로 솟아오르면서 팁형태

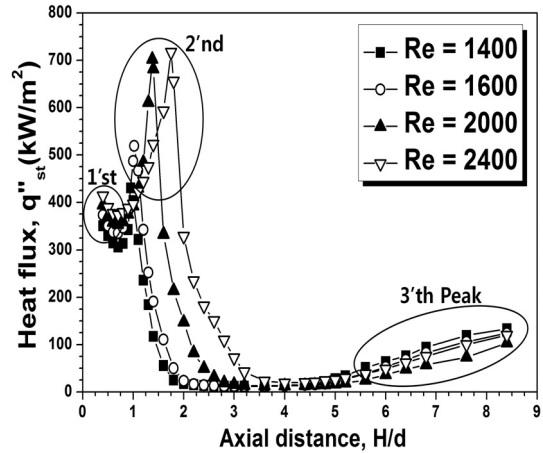


Fig. 3 Stagnation point heat flux profiles for various values of Reynolds number at different axial locations for d=10mm and  $\phi=2.5$

를 갖추어 가면서 증가되다가 완전한 팁형상으로 화염선단이 뾰족하게 되는 위치, 즉 겉보기에 내부반응대 끝인 내염의 팁이 충돌면에 닿게 되면 정체점 열유속이 가장 큰 값을 가리키는 2차 피크점 위치가 된다. 따라서 이 지점의 H/d 위치가 전파특성을 갖는 예혼합 충돌화염의 길이를 나타낸다고 볼 수 있다.

그런데 여기서 자세히 살펴보면 레이놀즈수 증가에 따라 2차 피크값인 열유속( $q''_{st}$ )이 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이는 대류 열전달계수에 직결된 누셀트(Nusselt)수가 레이놀즈수와 프란틀(Prandtl)수의 함수에서 프란틀수 차이는 미비하고 레이놀즈수에 비례하기 때문에 레이놀즈수가 큰 순으로 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 본 연구에서는 레이놀즈수가 1400, 1600, 2000, 2400에서 2차 피크점의 열유속 값은 각각 403kW/m<sup>2</sup>, 519kW/m<sup>2</sup>, 702kW/m<sup>2</sup>, 717kW/m<sup>2</sup>로 측정되었으며, 2차 피크점이 발생하는 충돌거리인 H/d의 값은 0.95, 1.02, 1.38, 1.75로 이 위치는 앞서 설명한바와 같이 내염의 길이를 의미하므로 레이놀즈수가 증가할수록 분출속도 증가로 인해 화염의 길이가 증가하는 것을 알 수 있다.

2차 피크점 이후에는 모든 레이놀즈수별로 열유속이 급격하게 감소하여 2차 최저값을 갖게 되는데 이

처럼 정체점 열유속이 2차 최저값을 나타내는 H/d 위치는 충돌화염이 이 위치에서 내부반응대의 연소 반응이 평형(equilibrium)이 되었다는 것을 의미하게 된다. 이후 평형된 연소반응에 의해 H/d가 증가하더라도 일정거리 구간에서는 정체점과 화염팁간 온도차가 미비해 정체점 열유속에서는 변화가 없음을 볼 수 있다.

그러나 일정거리 이후인 H/d=5.0 이상부터는 흥미롭게도 본 연구에서는 실험장치 한계로 3차 피크점 위치를 다 보여주지 못하였지만 레이놀즈수별로 열유속이 다시 증가하는 것으로 나타났다. 아울러 3차 피크점이 발생하는 이 구간에서 열유속이 증가하는 특성도 이전 2차 피크 경향과는 다르게 층류구간에서는 레이놀즈수가 작을수록 열유속 증가가 빨리 시작되면서 크기도 크게 되는 것을 볼 수 있다. 그러나 난류가 시작되면서부터는 그래프에서 보듯이 레이놀즈수 2400인 경우가 2000보다 피크구간 시작이 빨리 발생하면서 열유속도 더 크게 측정되어 층류와 난류 구간별로 다른 물리적 기구로 거동하는 것으로 사료된다. 이러한 3차 피크 현상은 충돌면이 버너출구로부터 어느 정도 멀리 위치하게 되면 충돌제트의 중심축 속도가 감소되기 전에 유속이 가속될 수 있는 거리가 확보되어 증가하는 것으로 판단된다. 그런데 이처럼 충돌제트화염의 후류에서 정체점 열유속이 다시 증가하는 현상에 대해서는 Ray<sup>16)</sup>의 메탄(CH<sub>4</sub>) 충돌화염에서도 볼 수 있는데 이 보고에서는 층류구간에서만 보고하고 있으며 난류가 되면서 층류의 열유속보다 증가하게 되는 현상은 이번이 처음이 된다.

### 3.2.2 당량비( $\phi$ )의 영향

Fig. 4는 충돌거리 H/d에 따른 정체점에서의 열유속을 당량비 별로 나타낸 그래프이다. 이 경우 당량비는 연소속도가 가장 빠른 2.5를 기준으로 상대적으로 희박한 당량비 2.0과 과농한 조건으로 당량비 3.0 일 때 레이놀즈수 1600으로 동일한 유동조건에서 당

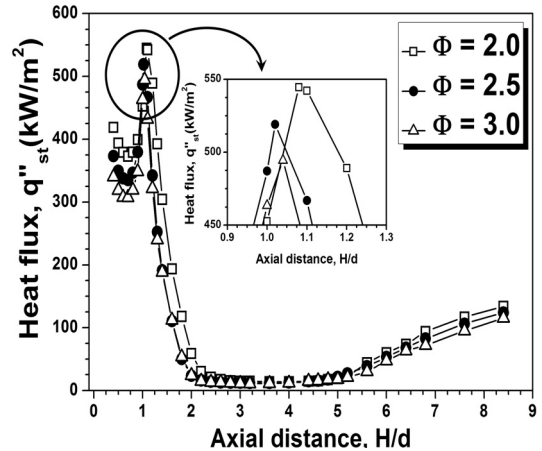


Fig. 4 Stagnation point heat flux profiles for various values of Reynolds number at different axial locations for d=10mm and Re=1600

량비에 따른 영향을 조사하였다. 이 경우에서도 앞의 Fig. 3의 경우와 마찬가지로 세 번의 피크점과 두 번의 최저점을 갖는 분포특성을 보여준다.

여기서도 내염이 충돌면에 닿게 되는 2차 피크점 이전 구간인 1차 피크점과 1차 최저점 발생구간에서 화염의 형태는 앞의 Fig. 3의 경우와 비슷하게 화염 선단이 라인에서 팁 형태로 거동하는 것으로 확인되었다. 당량비별로 2차 피크점이 나타나는 경향을 보면 당량비가 2.0, 2.5, 3.0 일 때 그에 따른 열유속 값은 544, 519, 494kW/m<sup>2</sup>이며 H/d의 값은 Fig. 4안에 별도로 크게 도시한 것처럼 1.08, 1.02, 1.04의 값으로 나타났다. 여기서도 2차 피크점이 일어나는 H/d는 내염의 길이를 의미하므로, 연소속도가 가장 빠른 당량비 2.5의 경우가 1.02로 가장 작은값으로 나타났으며 그 다음이 연소속도 순인 3.0, 2.0 순서로 나타나는 것을 볼 수 있다. 그러나 최대 열유속의 크기는 연소속도의 순서와는 다르게 당량비 2.0 > 2.5 > 3.0 순으로 나타난 것을 볼 수 있다. 이는 선 보고한 내용<sup>5)</sup>에서 알 수 있듯이 합성가스 연료의 단열화염온도가 당량비 2.0 > 2.5 > 3.0 순으로 나타나 충돌면의 정체점과 화염팁간 온도차가 이 순서로 차이가 나기 때문에 최대 열유속값 역시 당량비 2.0 > 2.5 > 3.0 순으로 나

타나게 되는 것이다.

이 경우에도 실험장치 한계로 정확한 3차 피크점 위치를 보여주지 못하였지만 2차 피크점을 지나 열유속은 감소하는 경향을 보이다 다시 증가하여 3차 피크점이 나타나게 된다. 3차 피크점을 위해 다시 증가하기 시작한 구간에서 열유속의 크기도 위와 같이 당량비 2.0>2.5>3.0 순으로 크게 나타나는데, 이는 유량조건이 동일한 레이놀즈수이기 때문에 혼합기 유속은 동일하나 당량비가 낮을수록 연료유량은 감소하나 산화제인 공기유량은 증가하게 되어 이에 따른 산화제 유속 증가로 인한 대류 열전달 효과가 증가되어 열유속이 증가되는 것으로 사료된다. 참고로 본 연구에서 각 조건별 공기유량은 당량비가 2.0, 2.5, 3.0인 경우 6.48, 5.84, 5.32L/min이다.

한편, 구간과 상관없이 1, 2, 3차 피크점이 발생되는 경향을 자세히 살펴보면 앞 절의 레이놀즈수 영향과는 다르게 모든 피크점에 해당되는 열유속 크기가 이전 연구<sup>5)</sup>에서 Chemkin II package로 계산한 단열화염온도 결과를 보면 단열화염온도 순인 당량비 2.0>2.5>3.0 순으로 되는 것을 알 수 있다. 따라서 1, 2차 피크발생 구간뿐만 아니라 바로 앞에서 설명한 3차 구간에서도 유동의 온도에 의한 영향으로 열전달 성능에 미치는 효과는 화염온도차가 지배적임을 다시 한번 확인할 수 있다.

### 3.3 반경방향 열전달특성

#### 3.3.1 충돌거리(H/d) 영향

Fig. 5는 Fig. 2-(a)의 화염형상을 갖는 조건에서 반경방향의 열전달특성을 나타낸 그래프이다. 즉, 당량비 2.5와 레이놀즈수 1600의 동일조건에서 충돌거리인 H/d별 반경방향의 열유속 분포로서, 충돌면이 내염을 간섭하는 H/d=0.8부터 비교적 먼 거리인 3.0인 경우에 각각의 열유속 변화를 보여주고 있다. 각 조건별로 한 번의 최대 피크점이 존재하며 피크점의

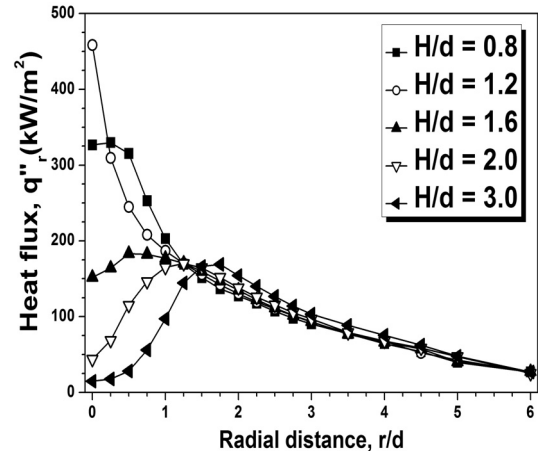


Fig. 5 Heat flux for various values of H/d at different radial distance locations for Re=1600,  $\Phi=2.5$

위치는 화염의 형상에 따라 다르게 나타나는 것을 볼 수 있다.

먼저, H/d=0.8의 경우 Fig. 2-(a)의 화염형상과 앞의 3.2.1에서 설명한 바와 같이 충돌거리가 너무 가까워 화염선단이 안으로 만곡된 형상을 하고 있는 관계로 열유속의 피크점이 센터에서 반경방향으로 약간 벗어난 위치에서 발생하고 있으며, 전체적으로 내염의 영향으로 화염 중심축을 중심으로 하여 종(bell)모양의 분포도를 나타내고 있다. 그런데 여기서 이전 연구<sup>6-15)</sup>와 다른 현상은 수소가 포함되지 않은 일반 가스연료의 충돌화염에서는 이처럼 충돌거리가 너무 가까워 충돌면에 간섭이 발생하는 경우 정체점뿐만 아니라 반경방향으로 일정거리까지는 차가운 미연혼합기 제트가 직접 충돌면에 닿아서 열유속 값이 0이거나 심지어는 음수로 발생하는 것으로 보고하고 있으나 본 연구와 같이 수소가 함유된 경우에는 앞절에서 설명한 현상처럼 미연 혼합기가 직접 충돌면에 닿질 않고 라인(line)형태로 화염선단이 존재하게 되어 확산속도가 매우 빠른 수소의 영향으로 나타나는 흥미로운 현상으로 사료된다. 이러한 현상에 대한 설명은 본 연구를 벗어나는 사항이므로 추후 계속된 연구를 통해서 규명할 예정이다.



충돌거리가  $H/d=0.8$ 에서 조금 증가하여 화염선단이 팁-형태로 바뀌면서 충돌면에 닿게 되는  $H/d=1.2$ 가 되면 충돌면 중심에서 가장 높은 열유속을 보인 뒤 반경방향으로는 급속히 감소되는 것을 볼 수 있다. 이후 계속해서 충돌거리가 증가되면서 충돌면의 간섭이 적어지는  $H/d=1.6 \sim 3.0$ 인 경우에는 정체점보다 반경방향으로 일정 위치에서 열유속 피크점이 발생한 후 다시 감소하는 경향을 보이고 있다. 이처럼 피크점이 정체점이 아닌 반경방향에 존재하는 이유는 충돌면과 내염간 거리가 멀어지면서 내염의 영향이 줄어드는 반면에 충돌면을 따라 형성되는 벽면제트영역 시작점 부근에 외염부분이 충돌하게 되면서 나타나는 현상으로 판단된다. 따라서 충돌거리가 멀어질수록 열유속 피크점이 중심에서 반경방향으로 좀 더 떨어진 곳에서 나타나는 것을 볼 수 있으며 이 피크점 발생위치를 기준으로 충돌화염에서 정체영역(stagnation region)과 벽면제트영역(wall jet region)으로 나눌 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 5에서 반경방향으로 나타난 열유속 분포 특성을 이와 같이 정체영역과 벽면제트영역으로 구분하여 반경방향의 열유속을 구간별 평균값과 충돌면 전체 평균열유속값( $\bar{q}_r''$ )으로 나타낸 그래프이다. 이 경우 Fig. 5에서 중심축에서 가장 먼 지점에서 최대 열유속을 나타내는  $r/d$ 가 1.75일 때를 기준으로 두 영역을 구분하였다. 따라서 Fig. 6의 표(legend)에서  $0 \leq r/d \leq 1.75$ 은 정체영역을,  $1.75 \leq r/d \leq 6.0$ 은 벽면제트영역,  $0 \leq r/d \leq 6.0$ 은 전체영역을 나타낸다. 그래프에서 보는바와 같이 정체영역에서는 영역특성상 충돌간격에 민감하여 충돌거리인  $H/d$ 가 클수록 급격하게 감소하는 경향을 보이거나 벽면제트영역에서는 거의 일정한 것을 볼 수 있다. 또한 두 영역을 평균한 충돌면 전체 평균열유속은 충돌면 거리가 증가함에 따라 완만하게 감소하는 경향을 보이는데, 이는 충돌면 거리가 증가할수록 외부로부터 차가운 산화제유입 등으로 인해 충돌간격에서 온도차 감소

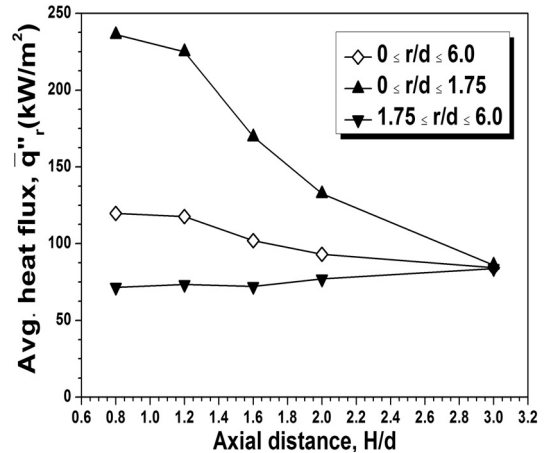


Fig. 6 Average heat flux for various values of  $H/d$  at different radial distance locations for  $Re=1600$ ,  $\phi=2.5$

에 따른 대류열전달이 감소되기 때문으로 판단된다.

### 3.3.2 레이놀즈수(Re) 영향

Fig. 7은 Fig. 2-(b)에서 보여진 화염형상을 갖는 조건에서 반경방향의 열전달특성을 나타낸 그래프이다. 측정은 당량비 2.5와 충돌거리가  $H/d=1.6$ 로 동일한 조건에서 레이놀즈수가 1200~2000인 층류구간과 난류초기 값인 2400별로 반경방향의 열유속분포를 조사하였다. 그런데 이 경우에는 앞의 (a)조건과 다르게 각 레이놀즈수별로 하나 또는 두개의 피크점이 존재하며 피크점은 화염의 형상에 따라 다른 위치에서 나타나는 것을 볼 수 있다.

먼저, 레이놀즈수가 1200, 1400, 1600인 경우 정체점에서 1차 피크점이 나타난 후 반경방향으로 가면서 감소하다 다시 증가하여 2차 피크점이 나타난 뒤 다시 감소하는 경향을 보여준다. 이처럼 1차 피크점이 나타나는 이유는 비교적 충돌면과 떨어져 있긴 하지만 온도가 높은 내염의 영향으로 정체영역인 충돌면 중심의 정체점에서 높은 열유속값을 보이다가 반경방향으로 벗어나 내염 팁에서 멀어지면서 감소하다 다시 벽면제트영역이 시작되는 외염이 평판에 충돌하는 부분에서 최대 열유속인 2차 피크점이 나

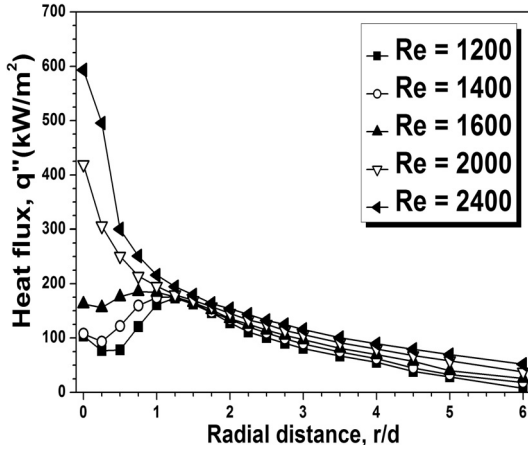


Fig. 7 Heat flux for various values of Reynolds number at different radial distance locations for H/d=1.6, Φ=2.5

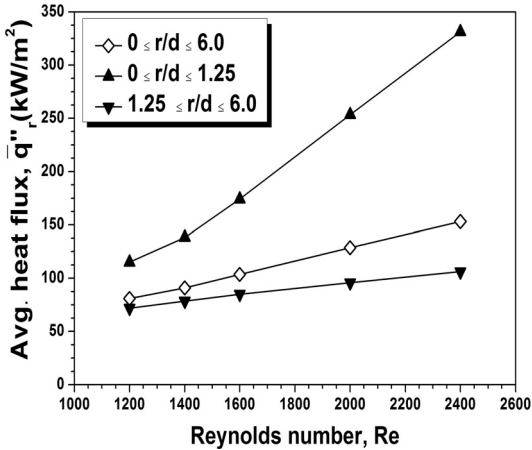


Fig. 8 Average heat flux for various Reynolds number at different radial distance locations for H/d=1.6, Φ=2.5

타나는 것으로 보인다. 이어서 혼합기 유속이 증가하여 내염이 층돌면에 닿게되는 레이놀즈수가 2000가 되면 정체점에서 최대이자 1차 열유속 피크점이 나타나며 이후 반경방향으로는 급격하게 감소하는 경향을 보이고 있다. 유속이 더 증가하여 난류 초기값인 레이놀즈수 2400에서는 정체영역에서 반경방향으로 열유속구배가 더욱 심하게 나타나며 벽면제트 영역서부터는 완만하게 감소하면서 Re=2000인 경우와 비슷한 분포특성을 보이고 있다. Fig. 7에서 보여준 레이놀즈수 전체에 따른 특성을 보면 정체영역뿐

만 아니라 벽면제트영역에서도 레이놀즈수 증가에 따라 누셀트수 증가로 인해 반경방향의 열유속 값도 함께 증가하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 7에서 중심축으로부터 가장 먼 지점에서 최대 열유속이 나타나는 r/d=1.25를 기준으로 정체영역과 벽면제트영역으로 나눈 영역별 평균값과 층돌면 전체 평균열유속 분포를 나타낸 그래프이다. 영역별로 보면 0≤r/d≤1.25인 정체영역에서는 급격하게 증가하였고, 1.25≤r/d≤6.0인 벽면제트영역에서는 완만하게 증가하는 것으로 나타났으며 0≤r/d≤6.0인 전체영역으로도 평균 열유속크기가 레이놀즈수에 비례하여 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서 이를 통해서도 레이놀즈수 증가에 따른 누셀트수 증가로 열유속이 증가하는 것을 다시 한번 확인할 수 있게 된다.

### 3.3.3 당량비(Φ) 영향

Fig. 9는 Fig. 2-(c)에서 보여진 화염형상을 갖는 조건에서 반경방향의 열전달특성을 나타낸 그래프이다. 여기서도 층돌거리인 H/d=1.6과 레이놀즈수 1600으로 동일한 조건에서 연소속도가 최대인 당량비 2.5를 기준으로 희박구간과 과농구간 당량비별로 반경방향의 열유속을 조사하였다. 분석결과 열유속은 당량비별로 하나의 피크점이 존재하는 분포를 하였으며, 피크점 위치는 당량비별로 화염의 형상에 따라 다른 위치에서 나타나는 것을 볼 수 있다.

먼저, 상대적으로 희박한 당량비가 1.0와 1.5인 경우 정체점에서 피크점이 나타나며 반경방향으로 갈수록 급하게 감소하는 경향을 보였다. 이는 내염이 층돌면에 간섭되거나(당량비 1.0) 접촉되는 형상(당량비 1.5)으로 비교적 층돌거리가 가까워서 정체영역에서 내염의 선단이 직접적인 영향을 주기 때문에 높게 나타나는 것으로 판단된다. 당량비가 증가하여 2.5인 경우 피크점이 정체점이 아닌 r/d가 0.75부분에서 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이는 당량비가 2.5

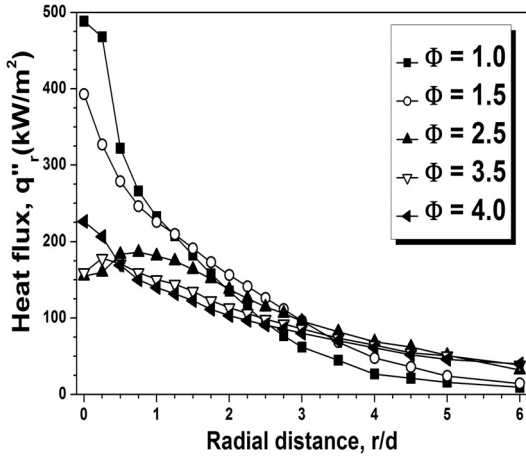


Fig. 9 Heat flux for various  $\Phi$  at different radial distance locations for  $H/d=1.6$ ,  $Re=1600$

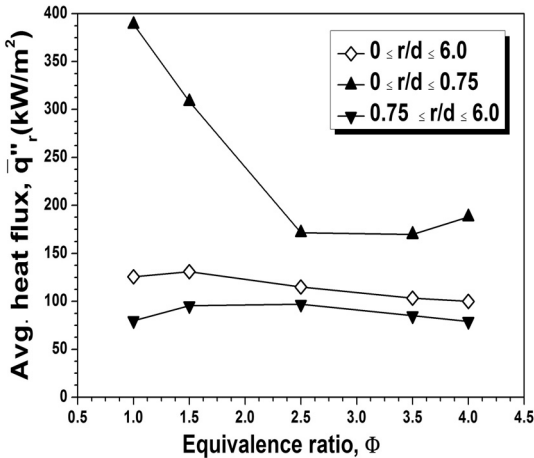


Fig. 10 Average heat flux for various  $\Phi$  at different radial distance locations for  $H/d=1.6$ ,  $Re=1600$

인 경우 연소속도가 가장 빠르기 때문에 내염이 당량비 1.5보다 짧아져 내염의 영향이 줄어들어 정체점 열유속이 낮게 나타나다가 반경방향으로 벽면제트영역 시작점에서 외염의 영향이 크게 나타나기 때문으로 보인다.

당량비가 3.5인 경우는 당량비가 2.5일 때와 비슷한 경향을 보여주며  $r/d$ 가 0.25에 피크점이 나타난다. 그런데 당량비가 증가하여 4.0인 경우 감소된 연소속도로 인해 화염의 길이가 늘어나 다시 내염의 영향을 받아서 내염의 팁과 가장 가까운 정체점에서 피

크점이 나타나고 이후 반경방향으로 완만하게 감소하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10은 Fig. 9에서 중심축에서 가장 먼 지점에서 최대 열유속을 나타내는  $r/d$ 가 0.75를 기준으로 정체영역과 벽면제트영역으로 나눈 영역별 평균과 충돌면 전체 평균열유속 분포를 나타낸 그래프이다. 영역별로 보면  $0 \leq r/d \leq 0.75$ 인 정체영역에서는 당량비 2.5까지는 급격하게 감소하다가 일정해진 후 다시 완만하게 증가하는 경향을 보였으며,  $0.75 \leq r/d \leq 6.0$ 인 벽면제트영역에서는 역시 당량비 2.5를 기준으로 완만하게 증가하다가 다시 완만하게 감소하는 것으로 나타났다. 그리고  $0 \leq r/d \leq 6.0$ 인 전체영역으로 보면 당량비 1.5를 기준으로 살짝 증가하다가 이후 계속해서 완만하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 따라서 평균 열유속값으로 표시한 이러한 결과를 보면 비록 충돌거리( $H/d=1.6$ )와 유동조건( $Re=1600$ )이 동일한 경우라도 Chemkin code로 계산한 단열화염온도(선 보고한 연구<sup>5)</sup>의 Fig. 9)에서 당량비 1.5 근처를 정점으로 당량비 증가에 따라 단열화염온도가 급하게 감소하는 것을 보면 충돌면 전체에서 나타난 평균 열유속값이 당량비 1.5 이후 감소하는 경향과 일치하는 것으로 보아 충돌면과 화염의 온도차로 나타나는 열전달 특성임을 다시 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구는 조성비가 일정한 합성가스-공기 예혼합 충돌화염의 연소 및 열전달 연구 중 열전달특성에 관한 연구로 주요 변수들에 따른 화염거동과 정체점 및 반경방향 열유속 특성에 대한 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 충돌화염의 열전달 특성에서 가장 큰 영향을 미치는 주요 변수들로 간격인 충돌거리( $H/d$ ), 유동조건인 레이놀즈수( $Re$ ) 그리고 연소조건인 당량비( $\Phi$ ) 변화에 따른 충돌화염의 거동을 직접사진

을 통해 비교하였다.

- 2) 충돌면 간섭이 생기는 충돌간격이 매우 작은 구간에서는 이전 일반 가스연료 충돌화염에서는 볼 수 없었던 수소의 빠른 반응으로 판단되는 화염 선단에서 라인형태의 화염형상과 만곡거동을 하는 것으로 확인하였다.
- 3) 정체점 열유속에서는 1, 2, 3차에 걸쳐 피크값이 발생하였는데 레이놀즈수가 클수록 누셀트수 증가로, 당량비가 작을수록 단열화염온도가 증가하여 열유속값이 증가하는 것으로 확인되었다.
- 4) 3차 피크가 발생하는 구간에서는 정체점의 열유속특성이 충류구간에서는 레이놀즈수가 증가함에 따라 열유속이 감소하면서 증가경향이 늦게 시작이 되는데 비해 난류가 되면 다시 일찍 시작이 되면서 증가하는 것으로 나타나 충류와 난류가 서로 다른 기구로 거동됨을 알았다.
- 5) 충돌면 중심으로부터 반경방향으로 열유속 특성을 정체영역과 벽면제트영역, 그리고 충돌면 전체에서 평균한 평균 열유속값으로 조사하여 구간별 열전달특성을 분석하였다.
- 6) 주요 변수별 특성이 평균 열유속 크기에 잘 반영되어 나타나는 것을 확인하였으며, 특히 충돌거리와 당량비별 특성에서는 동일한 유동조건임에도 불구하고 이들 변수값이 증가할수록 평균 열유속은 감소하는 경향이 합성가스 단열화염온도 경향과 일치하는 것으로 확인되었다.

## 후 기

본 연구는 2013년도 정부(교육부)재원인 한국연구재단 연구비의 지원을 받아 수행된 연구입니다.(NRF-2011-0009856)

## References

1. J.Y. Park, K.M. Lee, C.H. Hwang, "Stability

Characteristics of Syngas(H<sub>2</sub>/CO)/Air Premixed Flames using an Impinging Jet Burner", The Korean Society of Combustion, Vol. 16, No. 1, 2011 pp. 15-21.

2. K.J. Kang, T.J. Part, C.H. Whang, K.M. Lee, "A Study on Combustion Characteristics of Synthetic Gas Air Lifted Premixed Flames with High Strain Rate in an Impinging Jet Combustion Field", The Korean Society of Combustion, Vol. 16, No. 4, 2011 pp. 31-37.
3. B.G. Jeong, K.M. Lee, S.R. Lee, "Laminar Flame Speed Measurements and Flame Structure Differences of Syngas(H<sub>2</sub>/CO)-Air Mixture in Lean and Rich Conditions", Asia-Pacific Conference on Combustion, Proceedings of ASPACC 2013, pp. 112.
4. B.G. Jeong, K.M. Lee, "A Study on the Laminar Burning Velocity of Synthetic Gas of Coal Gasification(H<sub>2</sub>/CO)-Air Premixed Flames", Trans. of the Korean Society of Hydrogen Energy, Vol. 23, No. 5, 2012, pp. 493-502.
5. B.G. Jeong, K.M. Lee, "A Study on Combustion and Heat Transfer in Premixed Impinging Flames of Syngas(H<sub>2</sub>/CO)/Air Part I: Characteristics of Combustion", Trans. of the Korean Society of Hydrogen Energy, in submitted.
6. J.K. Kilham and M.R.I. Purvis, "Heat Transfer from Normally Impinging Flames", Combustion Sci. Technol., Vol. 18, 1978, pp. 81-90.
7. K. Hargrave, M. Fairweather, J.K. Kilham, "Forced convection heat transfer from impinging flames, Part II, Impingement heat transfer", International Journal of Heat Fluid Flow, Vol. 8, 1987, pp. 132-138.
8. T.H. Van der Meer, "Stagnation Point Heat Transfer from Turbulent Low Reynolds Number Jets and Flame Jets", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 4, 1991, pp. 115-126.
9. R. Viskanta, "Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 6, 1993, pp. 111-134.

10. E. Baukal, B. Gebhart, "A review of flame impingement heat transfer, Part I: Experimental conditions" *Combustion Science and Technology*, Vol.104, 1995, pp.339-357.
11. L.L. Dong, C.S. Cheung, C.W. Leung, "Heat transfer of an impinging butane/air flame jet of low Reynolds number", *Experimental Heat Transfer*, Vol. 14, 2001, pp. 265-282.
12. L.C. Kwok, C.S. Cheung, C.W. Leung, "Heat transfer characteristics of slot and round pre-mixed impinging butane/air flame jet", *Experimental Heat Transfer*, Vol. 16, 2003, pp. 111-137.
13. S.G. Tuttle, B.W. Webb, M.Q. McQuay, "Convective Heat Transfer from a Partially Premixed Impinging Flame Jet. Part I : Time Averaged Results", *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, 2005, pp 1236-1251.
14. Subhash Chander, Anjan Ray, "Flame Impingement Heat Transfer : A review", *Energy Conversion and Management*, Vol. 46, 2005, pp. 2803-2837.
15. S. Chander, A. Ray, "Influence of Burner Geometry on Heat Transfer Characteristics of Methane/Air Flame Impinging on Flat Surface", *Experimental Heat Transfer*, Vol. 19, 2006, pp 15-38.
16. Subhash Chander, Anjan Ray, "An Experimental and Numerical Study of Stagnation Point Heat Transfer for Methane/Air Laminar Flame Impinging on a Flat Surface", *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, 2008, pp 3595-3607.
17. Subhash Chander, Anjan Ray, "Experimental and Numerical Study on the Occurrence of Off-Stagnation Peak in Heat Flux for Laminar Methane/Air Flame Impinging on a Flat Surface", *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, 2011, pp 1179-1186.